

Ein Ansatz zur Festlegung der Sperrzeiten nach einer Motorschutzauslösung bei explosionsgeschützten Antrieben

Christian Lehrmann¹, Uwe Dreger¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.6 „Explosionsgeschützte Sensorik und Messtechnik“, Braunschweig

Bei explosionsgeschützten Antrieben der Kategorie 2 kommt neben der Funktionalität, dem zuverlässigen Betrieb und den Sicherheitsaspekten auch bei vorhersehbaren Störungen eine sehr große Bedeutung zu. Bei elektrischen Maschinen sind der Überlastfall und der Blockierfall derartige vorhersehbare Störungen, bei deren Auftreten der Antrieb gemäß Richtlinie 2014/34/EU abgeschaltet werden muss wenn mit dem Auftreten unzulässiger Temperaturen zu rechnen ist. Das Ziel des Betreiber des Antriebes ist es dann, den Antrieb möglichst schnell wieder in Betrieb nehmen zu können. Hierbei sind jedoch ausreichend lange Abkühlzeiten vor der Wiedereinschaltung einzuhalten. Im Rahmen dieses Beitrages werden ein mögliches Vorgehen zur Bestimmung der minimalen Abkühlzeiten aufgezeigt und die bisher vorliegenden Ergebnisse vorgestellt.

Einleitung

Explosionsgeschützte Geräte der Kategorie 2 zum Einsatz in den Zonen 1 (Gasexplosionsschutz) oder 21 (Staubexplosionsschutz) dürfen weder im normalen, ungestörten Betrieb noch bei wahrscheinlichen und anzunehmenden Fehlern für die potentiell das Gerät umgebende explosionsfähige Atmosphäre, charakterisiert z.B. durch die Temperaturklasse, zur Zündquelle werden. [1]

Bei elektrischen Maschinen sind die Überlastung und der Blockierfall als wahrscheinliche Fehlerzustände zu bezeichnen, bei dessen Vorliegen durch gemäß Richtlinie 2014/34/EU funktionsgeprüfte Schutzeinrichtungen unzulässig hohe Temperaturen des Stators, des Rotors und am Gehäuse sicher verhindert werden müssen.

Hierbei können elektrische Maschinen sowohl über eine stromabhängig-verzögerte Überstromschutzeinrichtung, dem „Motorschutzschalter“ als auch durch eine Einrichtung zur direkten Temperaturüberwachung z.B. mittels in die Wicklung eingebrachten Kaltleitern, geschützt werden. Hierbei ist jedoch je nach Temperaturklasse der möglichen umgebenden explosionsfähigen Atmosphäre und der Baugröße der Maschine die Temperaturüberwachung des Rotors eine Herausforderung, und oftmals ist bei größeren Maschinen, z.B. ab 132 mm Achshöhe, ein Alleinschutz mittels Kaltleiter nicht mehr möglich. Hier kann dann der Kaltleiter nur als zusätzliche Temperaturüberwachung zu einem zwingend einzusetzenden Motorschutzschalter eingesetzt werden. Bild 1 zeigt häufige Ursachen für die Schutzabschaltung elektrischer Maschinen.

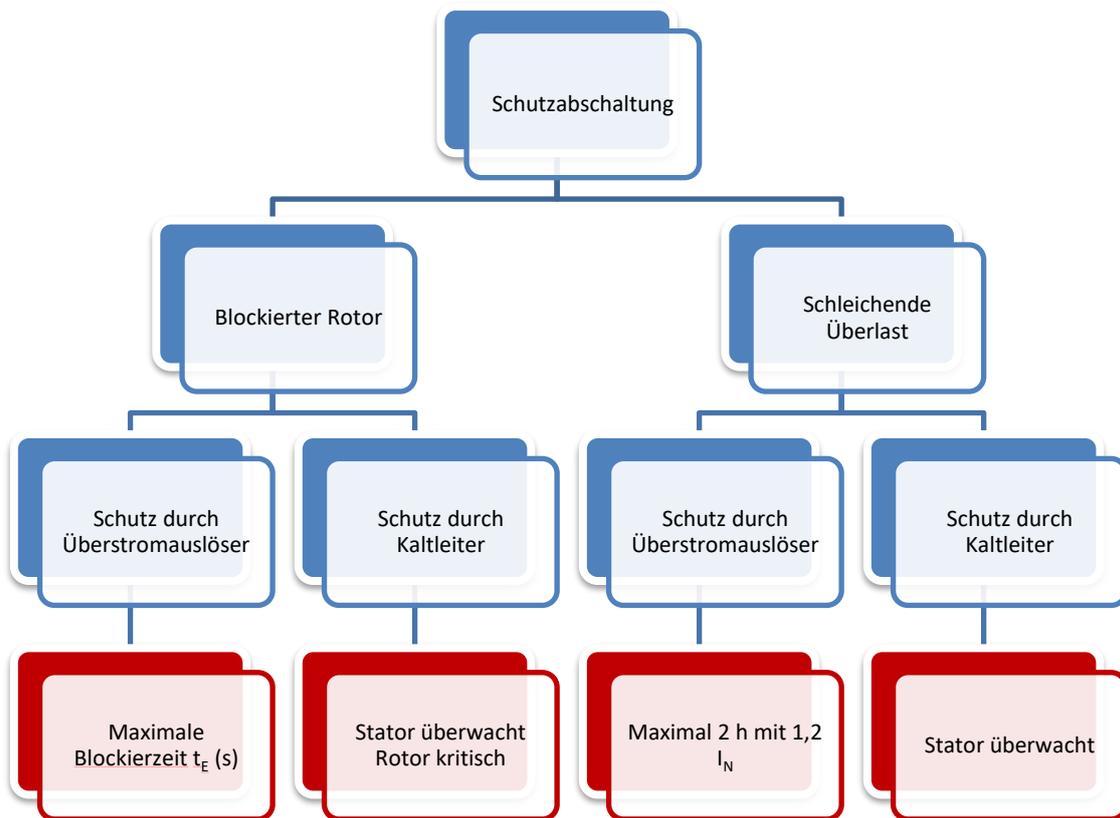


Bild 1: Häufige Ursachen für die Schutzabschaltung elektrischer Maschinen

Durch die entsprechende Auslegung der Maschine und der Schutzeinrichtung ist dann sicherzustellen, dass auch bei der Blockierung der betriebswarmen Maschine nicht mit unzulässigen Temperaturen zu rechnen ist. [2].

Von besonders für den Betreiber großer Bedeutung ist jetzt die Frage, nach welcher Abkühlzeit nach der Schutzauslösung der Motor wieder eingeschaltet werden darf, so dass auch bei einer erneuten Blockierung keine unzulässigen Temperaturen auftreten. Hierbei müssen bei Maschinen der Zündschutzart Ex eb [3] neben den Gehäuseoberflächen und der Motorwelle an der Durchführung auch alle inneren Maschinenteile, wie z.B. der Rotor, die Statorwicklung und das Statorblechpaket sowohl die Temperaturklassengrenzen als auch alle Begrenzungen der verwendeten Materialien einhalten.

Das Abkühlverhalten elektrischer Maschinen

Die Asynchronmaschine kann vereinfachend als ein Netzwerk aus den Wärmekapazitäten Gehäuse, Statorblechpaket, Statorwicklung und Rotor mit den entsprechenden Wärmeübergangswiderständen zwischen diesen Wärmekapazitäten nachgebildet werden. Die in den Maschinenteilen Gehäuse, Statorblechpaket, Statorwicklung und Rotor auftretenden Verlustleistungen werden dabei gemäß Bild 3 durch einen eingepprägten Wärmestrom nachgebildet und die Lagerreibungsverluste dem Rotor zugeschlagen. Die Reibungsverluste werden hierbei den Rotorverlusten zugeordnet.

Der in Bild 3 in roter Farbe dargestellte Wärmeübergangswiderstand der Gehäuseoberfläche zur Umgebung ist dabei bei eigenbelüfteten Maschinen stark über einen nichtlinearen Zusammenhang drehzahlabhängig, Bild 2

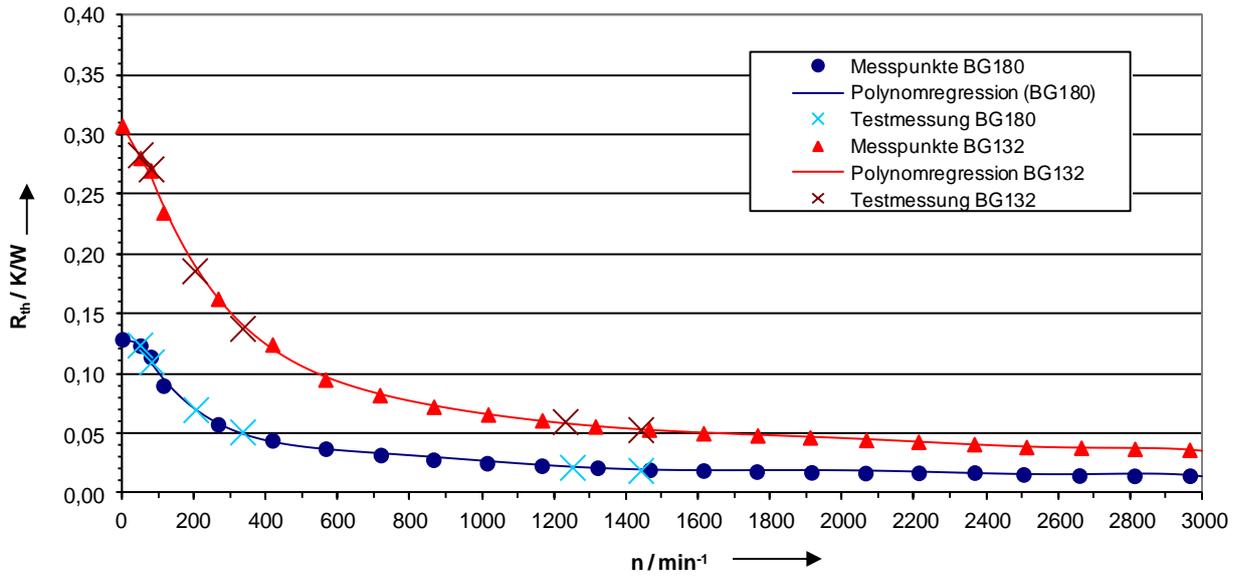


Bild 2: Darstellung des drehzahlabhängigen thermischen Widerstandes Gehäuse – Umgebung für 4- polige Motoren der Achshöhen 132mm und 180 mm

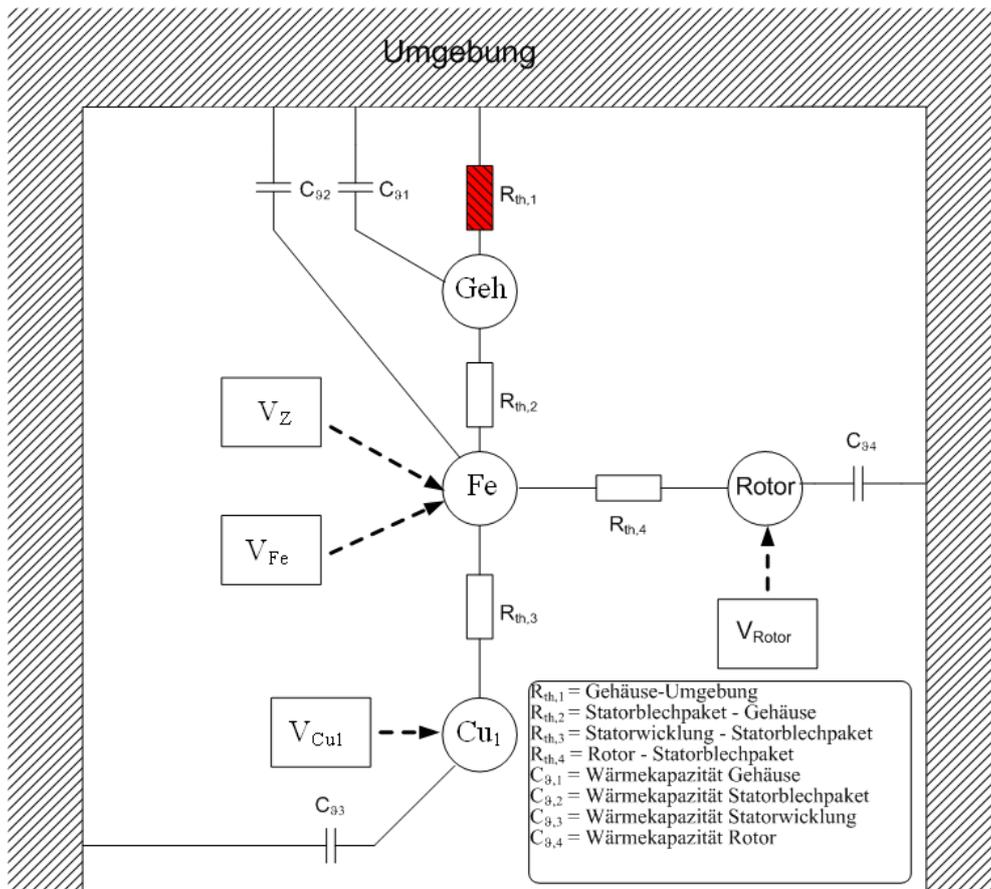


Bild 3: Thermisches Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Während des Betriebes nehmen die einzelnen Maschinenteile bedingt durch die eingebrachte Verlustleistung und die Wärmeübergangswiderstände zur jeweiligen Umgebung unterschiedliche Temperaturen an, welche nach ausreichend langem Betrieb konstant bleiben (thermischer Beharrungszustand). Nach dem Abschalten der Maschine und dem Stillstand des Lüfters steigt der Wärmeübergangswiderstand zur Umgebung gemäß Bild 2 deutlich an, und bedingt durch die gute thermische Anbindung (Wärmeleitung) der Statorwicklung über das Blechpaket an den Stator gleichen sich die Wicklungstemperatur und die Gehäusetemperatur an, zeitlich verzögert gefolgt von der Rotortemperatur. Die Ursache der Verzögerung ist hier der fehlende direkte metallische Kontakt des Rotors zum Statorblechpaket, wodurch der Wärmetransport vom Rotor zum Stator nur über den relativ hohen Wärmeübergangswiderstand des Luftspaltes erfolgen kann, wenn man in dieser vereinfachenden Annahme den Wärmefluss über die Lager vernachlässigt, Bild 5, Bild 6. Für den Temperaturverlauf nach dem Überlastfall ist es daher auch signifikant, ob die Maschine abgeschaltet wurde oder im Leerlauf weiter betrieben wird. Im Folgenden wird der Fall „Abschaltung der Maschine nach dem Überlastfall“ betrachtet.

Randbedingungen für den sicheren Betrieb Maschinen Ex eb

Bei der Zertifizierung einer explosionsgeschützten Maschine der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit wird bei Maschinen für den Betrieb am Netz in der Regel im Datenblatt der EU-Baumusterprüfbescheinigung neben den Bemessungsdaten und dem Verhältnis des Anzugstromes zum Bemessungsstrom I_A/I_N die Zeit t_E für die jeweilige Temperaturklasse angegeben, z.B. für die Temperaturklasse T3 $t_E = 15\text{s}$. Lediglich bei Maschinen, die über eine Einrichtung zur direkten Temperaturüberwachung geschützt werden, entfällt die Angabe der Zeit t_E . [2]

Diese Angabe bedeutet praktisch, dass die Maschine bei Blockierung aus der Dauerbetriebserwärmung heraus spätestens nach der Zeit t_E , hier 15 s, vom Motorschutz abgeschaltet werden muss um eine Überschreitung der Temperaturgrenzen und somit eine Explosionsgefahr auszuschließen. Der Betreiber muss dabei über die Auslösekennlinie des Motorschutzes [6] und dem angegebenen Verhältnis I_A/I_N sicherstellen, dass der Motorschutz die Maschine innerhalb der Zeit t_E abschaltet.

Beim deutlich selteneren Fall des möglichen und bescheinigten Alleinschutzes über Kaltleiter (betrifft überwiegend kleinere, statorkritische Maschinen bis zur Achshöhe 132 mm) erfolgt sowohl im Überlastfall als auch bei Blockierung die Abschaltung über in die Wicklungsstränge eingebrachte Temperatursensoren in Verbindung mit einem gemäß Richtlinie 2014/34/EU funktionsgeprüften Auswertegerät.

Hierbei wird durch Versuche im Rahmen der Baumusterprüfung [2] sichergestellt, dass sowohl beim Blockieren der betriebswarmen Maschine bei der höchsten zulässigen Raumtemperatur als auch bei kalter Maschine bei der tiefsten zulässigen Umgebungstemperatur der Rotor keine unzulässigen Temperaturen annimmt. Die Temperatur der Statorwicklung wird bei diesem Schutzkonzept generell durch die Temperatursensoren sicher begrenzt, Bild 4.

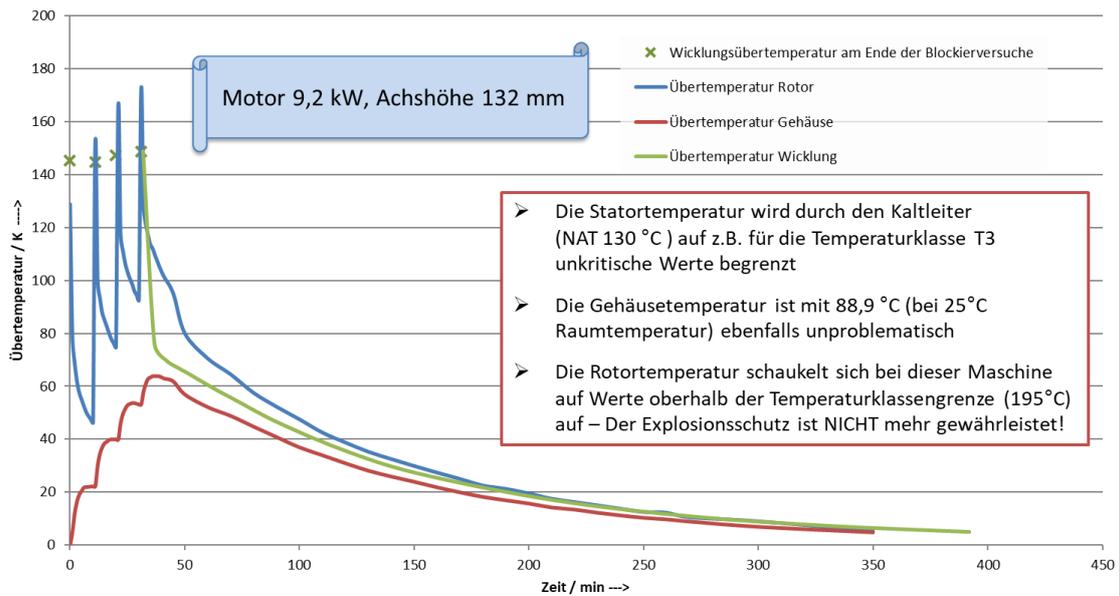


Bild 4: mehrfaches Einschalten einer blockierten Asynchronmaschine bis zum Ansprechen der direkten Temperaturüberwachung

Es muss bei explosionsgeschützten Maschinen ausgeschlossen werden, dass es bei blockierter Maschine gemäß Bild 4 zu einem Aufschaukeln der Rotortemperatur über die Temperaturklassengrenze kommt wenn ohne ausreichende Abkühlzeit die blockierte Maschine mehrfach hintereinander bis zum Ansprechen des Motorschutzes betrieben wird. Dieses Verhalten ist durch die bessere Wärmeableitung aus der Statorwicklung zur Umgebung als aus dem Rotor der Maschine über den Luftspalt zum Stator bedingt.

Abschaltung nach schleichender Überlast

Basierend auf diesen Kenntnissen lässt sich zunächst einmal vereinfachend für die Festlegung der Abkühlzeit nach einer Motorschutzauslösung der Ansatz heranziehen, dass bei einer mittels zeitabhängigem Überstromschutz (Motorschutzschalter) überwachten Maschinen vor einer Wiederinbetriebnahme sowohl der Stator als auch der Rotor mindestens bis auf die jeweiligen Dauerbetriebserwärmungen bei Bemessungsbetrieb abgekühlt sein müssen. Bei einer mittels direkter Temperaturüberwachung geschützten Maschine muss die Abkühlung des Rotors auf die Erwärmung bei Bemessungsbetrieb erfolgt sein, die Statortemperatur wird durch die Temperatursensoren auf unkritische Werte begrenzt.

Bei den in der PTB an Motoren verschiedener Achshöhen, Bemessungsleistungen und Wirkungsgradklassen durchgeführten Untersuchungen wurde zunächst die Fallunterscheidung „Überlast“ und „Blockierung“ getroffen und beide Situationen durch Versuche in unserem Prüffeld nachgestellt.

Für den in diesem Beitrag im Detail betrachteten Fall „Überlastung“ wurde hierbei die Maschine nach Erreichen des thermischen Beharrungszustandes für zwei Stunden mit dem 1,2-fachen Wert des Bemessungsstromes betrieben und nach Abschaltung der Maschine wurden dann die Temperaturen des Gehäuses, der Statorwicklung und des Rotors über eine längere Zeit aufgezeichnet und aus den Verläufen auch die Abkühlzeitkonstanten bestimmt.

Diese Vorgehensweise stellt den Worst-Case-Fall dar, denn gemäß den gültigen normativen Festlegungen [6] müssen stromabhängige Motorschutzeinrichtungen beim 1,2-fachen Bemessungsstrom nach spätestens zwei Stunden ansprechen und den Motor abschalten.

Gemäß der Definition, dass die Zeit t_E diejenige Zeit ist, für die der betriebswarme Motor maximal blockiert an Bemessungsspannung betrieben werden darf ohne das unzulässige Temperaturen auftreten und der Vorgabe, dass der Motorschutz die blockierte Maschine spätestens nach der Zeit t_E abschalten muss, kann die Abkühlzeit wie folgt definiert werden:

Die Abkühlzeit muss nach einer Überlast-Motorschutzauslösung mindestens der Zeit entsprechen, die erforderlich ist, damit alle Maschinenteile mindestens bis auf die Dauerbetriebserwärmung bei Bemessungsbetrieb abgekühlt sind.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Temperaturverläufe an einer Maschine der Bemessungsleistung 2,7 kW im Überlastfall und nach Ansprechen der Schutzeinrichtung sowie die graphische Bestimmung der minimalen Abkühlzeit bis zum erneuten Einschalten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen die Erwärmungen im Bemessungsbetrieb.

Ist die Maschine für den Alleinschutz mittels direkter Temperaturüberwachung ausgelegt, so wird bei netzgepeisten Maschinen während des Zertifizierungsprozesses auch überprüft, ob die Temperaturüberwachungseinrichtung beim Blockieren der betriebswarmen Maschine sowohl im Stator als auch im Rotor unzulässige Temperaturen sicher verhindert. Aus diesem Grund ist auch hier ein Wiedereinschalten der Maschine auf jeden Fall wieder möglich, sobald alle Teile der Maschine wieder auf die Temperaturen im Bemessungsbetrieb abgekühlt sind.

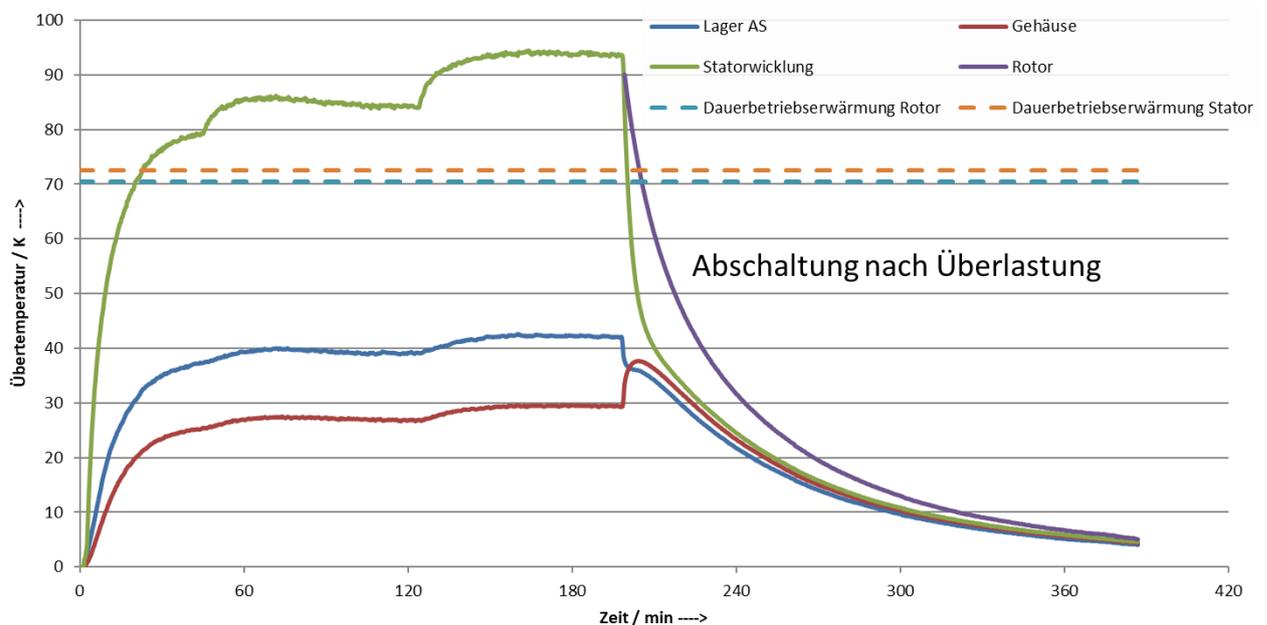


Bild 5: Abkühlvorgang an einer Maschine der Bemessungsleistung 2,7 kW nach Motorschutzauslösung (Beispiel)

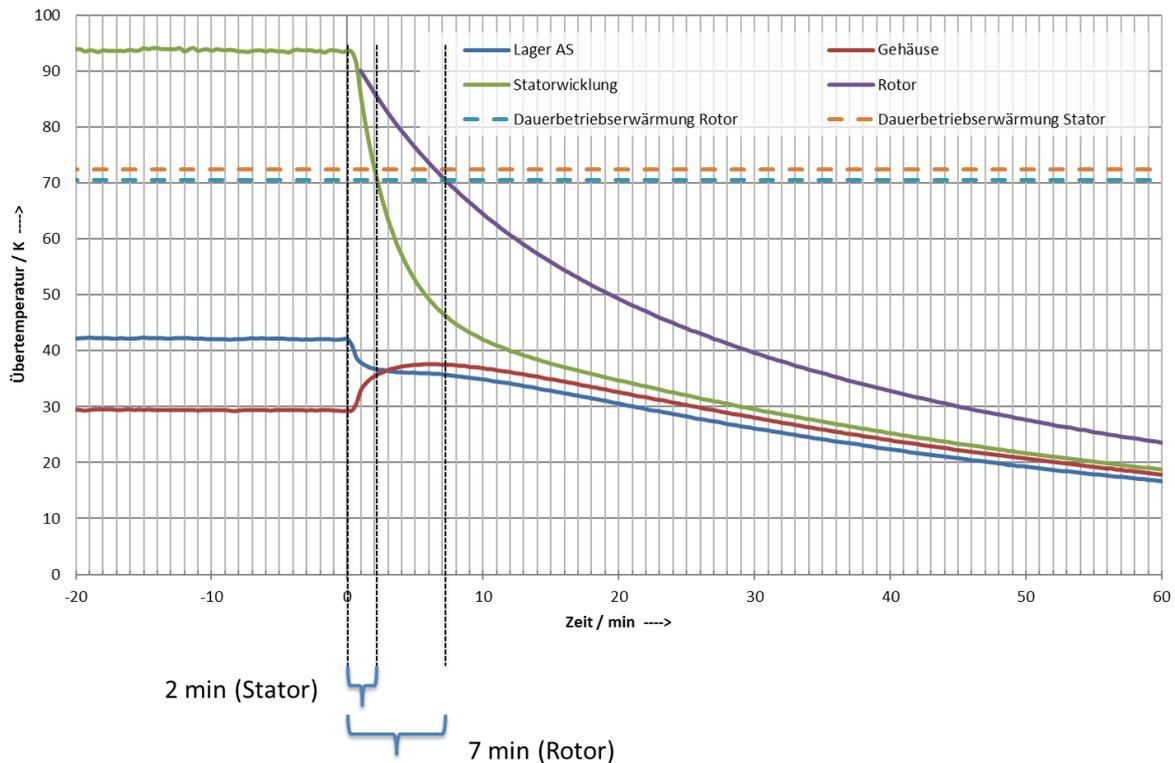


Bild 6: Bestimmung der minimal erforderlichen Abkühlzeit nach einer Motorschutzauslösung, Maschinenbemessungsleistung 2,7 kW

Bei frequenzumrichter gespeisten Maschinen, die generell beim Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen über eine Einrichtung zur direkten Temperaturüberwachung zu schützen sind, muss hingegen nach einer Überlastauslösung vor dem Wiedereinschalten außer der Rücksetzzeit der Temperaturüberwachungseinrichtung keine zusätzliche Wartezeit vorgesehen werden, da der maximal mögliche Maschinenstrom bei korrekter Auslegung und Parametrierung des Frequenzumrichters auf z.B. den 2-fachen Motorbemessungsstrom begrenzt ist und damit die Temperaturanstiegsgeschwindigkeiten und somit auch das Risiko des Auftretens unzulässiger Rotortemperaturen beim Ansprechen der Temperaturüberwachungseinrichtung deutlich reduziert ist.

Hinzu kommt bei frequenzumrichter gespeisten Antrieben, dass die direkte Temperaturüberwachung bei korrekter Parametrierung des Frequenzumrichters (frequenzabhängige Strombegrenzung) überhaupt nur bei unzureichender Kühlung der Maschine, z.B. durch Verschmutzung, oder aber bei einer Fehlfunktion des Umrichters anspricht.

Es wird dabei im Rahmen der Zertifizierung des Motors durch Prüfung sichergestellt, dass die direkte Temperaturüberwachung den Motor auch ohne die Schutzfunktionen des Umrichters sicher schützt, so dass der Frequenzumrichter nicht gemäß Richtlinie 2014/34/EU als Überwachungsgerät funktionsgeprüft werden muss.

Blockierte Maschine

Beim Einschalten der blockierten Maschine erfolgt innerhalb der Zeit t_E bedingt durch die hohen Stromdichten sowohl im Rotor als auch in der Statorwicklung ein sehr schneller Temperaturanstieg, der zunächst zu einer adiabatischen Erwärmung der elektrisch aktiven Teile in Stator und Rotor führt, bevor sich nach dem Abschalten zu einem langsamen Temperatúrausgleich mit dem Stator und Rotorblechpaket sowie dem Gehäuse kommt.

Gemäß den Angaben im Datenblatt zur EU-Baumusterprüfbescheinigung ist aus dem betriebswarmen Zustand heraus ein blockierter Betrieb für die Zeit t_E möglich, ohne dass Maschinenteile unzulässige Temperaturen annehmen. Wird bei einem Anlaufvorgang die Zeit t_E nicht komplett ausgeschöpft (was die Regel ist), sind auch ohne zwischenzeitliche Abkühlzeit mehrere Anläufe möglich, solange die Zeitdauern der einzelnen Anläufe in der Summe die Zeit t_E nicht überschreiten.

Das folgende Beispiel verdeutlicht diesen Zusammenhang:

| | |
|---|------|
| Zeit t_E : | 15 s |
| Anlaufzeit: | 3 s |
| Maximal aufeinander folgende Anläufe ohne Abkühlzeit: | 5 |

Hieraus folgt, dass unmittelbar hintereinander maximal fünf Anläufe bei bereits betriebswarmer Maschine erfolgen dürfen. Daraus ergibt sich allerdings auch, dass im Störfall, wenn der Motor durch die Schutzeinrichtung nach der Zeit t_E abgeschaltet wurde, vor dem nächsten Startversuch eine ausreichend lange Abkühlzeit eingehalten werden muss. [7] Erschwerend kommt hierbei hinzu, dass z.B. bei Pumpenantrieben bedingt durch den anlagentechnischen Aufbau auch Störungen, z.B. fehlender Durchfluss bei einer Pumpe, auftreten, der zum einen durch Luft im Leitungssystem, aber auch durch eine mechanisch blockierte Pumpe verursacht werden können. Ist nun die Ansprechzeit der Durchflussüberwachung kürzer eingestellt als die Ansprechzeit des Motorschutzschalters bei blockierter Maschine, ist die Ursache der Störung zunächst nicht offensichtlich, und der Irrglaube des Bedieners, die Ursache sei Luft im Leitungssystem, kann bei blockierter Maschine zu unzulässigen Erwärmungen führen, wenn nacheinander mehrere Startversuche unternommen werden und die gesamt-Blockierzeit die Zeit t_E des Antriebes überschreitet.

Zusammenfassung der Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit einem Partner aus der chemischen Industrie wird diese Thematik aktuell systematisch durch Messungen und theoretische Betrachtungen untersucht. Eine Auswahl der bisher untersuchten Maschinen ist in der Tabelle 1 aufgeführt

Tabelle 1: eine Auswahl der bisher hinsichtlich „schleichender Überlast“ untersuchten Maschinen

| Nr. | Achshöhe | Polzahl | Bemessungsleistung | Gehäusewerkstoff | Zeit t_E (T3) |
|-----|----------|---------|----------------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | 63 mm | 4 | 0,18 | Aluminium | 60 s |
| 2 | 71 mm | 4 | 0,37 | Aluminium | 34 s |
| 3 | 80 mm | 4 | 0,55 kW | Aluminium | 28 s |
| 4 | 90 mm | 2 | 1,3 kW | Grauguss | 8 s |
| 5 | 112 mm | 2 | 3,3 kW | Grauguss | 9 s |
| 6 | 132 mm | 4 | 5,5 kW | Aluminium | 9 s |
| 7 | 200 mm | 4 | 24 kW (Ex eb T3), sonst 30 kW | Grauguss | 10 s |

Die Maschinen 1 – 6 wurden hierbei zunächst mit Bemessungslast bis zum Erreichen des thermischen Beharrungszustandes (hier definiert als Temperaturänderungsgeschwindigkeit am Gehäuse unter 2 Kelvin pro Stunde) betrieben und die Temperaturen der Statorwicklung, des Rotors und des Gehäuses bestimmt. Anschließend wurden die Maschinen erneut bis zum Erreichen des thermischen Beharrungszustandes mit Bemessungsleistung betrieben, anschließend wurde die Belastung gesteigert bis der Strangstrom der Maschinen den 1,2-fachen Wert des Bemessungsstromes angenommen hatte. Die Maschinen wurden dann für 2 h in diesem Betriebspunkt betrieben und anschließend die Temperaturverläufe für den Stator, den Rotor und das Gehäuse mindestens bis zum Erreichen der Erwärmungen des Bemessungsbetriebes aufgezeichnet. Die minimale Abkühlzeit jeder Maschine gilt als erreicht sobald alle Temperaturen die nach dem Betrieb mit Bemessungsleistung gemessenen Temperaturen erreicht oder unterschritten haben.

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Maschinen 1 bis 6 nach dem zweistündigen Betrieb mit dem 1,2-fachen Bemessungsstrom wieder den thermischen Beharrungszustand erreicht haben, dieses bei der Maschine 7 bedingt durch die deutlich größere Masse allerdings nicht der Fall gewesen ist. Mit diesem Hintergrund wird auch die kürzere minimale Abkühlzeit (bei Einbeziehung des Gehäuses) der Maschine 7 im Vergleich zur Maschine 6 erklärbar.

Die minimalen Abkühlzeiten der bisher untersuchten Maschinen 1 – 7 stellen sich dabei wie folgt dar:

Tabelle 2: Übersicht über die Abkühlzeiten (gerundet auf nächsten ganzzahligen Wert) sowie die Temperaturerhöhung gegenüber dem Bemessungsbetrieb.

| Nr. | Achshöhe | Polzahl | Abkühlzeit Stator | Abkühlzeit Rotor | Abkühlzeit Gehäuse |
|-----|----------|---------|-------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 63 mm | 4 | 9 min / 27,9 K | 12 min / 31,4 K | 24 min / 19,7 K |
| 2 | 71 mm | 4 | 8 min / 29,7 K | 11 min / 32,9 K | 28 min / 18,4 K |
| 3 | 80 mm | 4 | 5 min / 10,6 K | 9 min / 19,5 K | 24 min / 10,5 K |
| 4 | 90 mm | 2 | 2 min / 13,4 K | 9 min / 14,2 K | 33 min / 6,3 K |
| 5 | 112 mm | 2 | 7 min / 27,9 K | 18 min / 26,3 K | 45 min / 12,4 K |
| 6 | 132 mm | 4 | 29 min / 25,6 K | 34 min / 39,2 K | 48 min / 16,6 K |
| 7 | 200 mm | 4 | 47 min / 31,7 K | 23 min / 40,3 K | 44 min / 16,2 K |

Im Rahmen weitergehender Untersuchungen ist eine systematische Untersuchung des Verhaltens für den Achshöhenbereich 132 mm – 180 mm an Maschinen mit einem und zwei Polpaaren sowie die Erstellung eines Simulationsmodelles geplant. Bild 7 zeigt die Temperaturverläufe nach dem Abschalten der Maschine 7 nach zweistündigem Betrieb mit dem 1,2-fachen Bemessungsstrom.

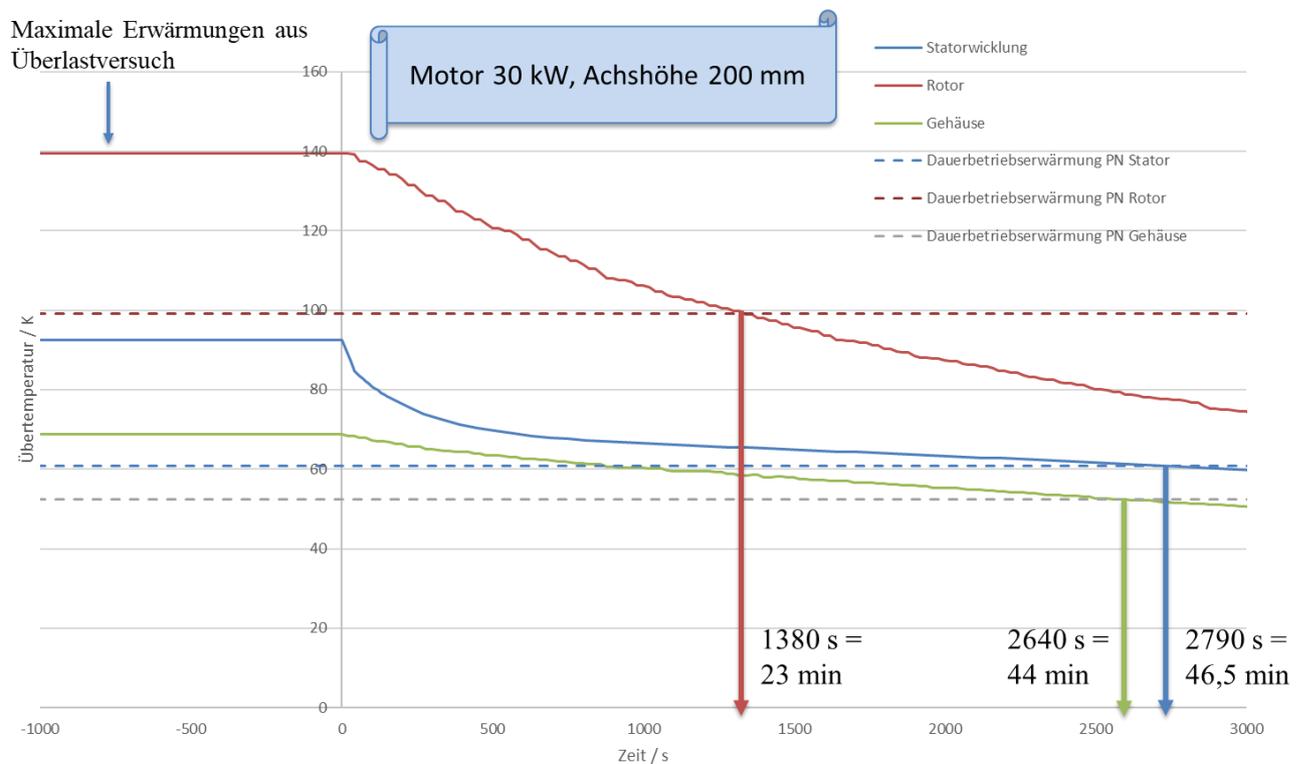


Bild 7: Temperaturverläufe nach dem Abschalten bei der Maschine 7

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Auswertung der bisher durchgeführten Untersuchungen zur minimalen Abkühlzeit nach einer Motorschutzauslösung konnte bisher kein klarer und eindeutiger Zusammenhang zwischen der Bemessungsleistung und der minimalen Abkühlzeit gefunden werden. Gemäß Bild 8 kann bisher aber die Aussage getroffen werden, dass nach einer Abkühlzeit von 50 Minuten nach dem Betrieb im Überlastfall für 2 h mit 1,2-fachem Bemessungsstrom die bisher untersuchten Maschinen mit einer Bemessungsleistung bis 5,5 kW unabhängig vom Gehäusewerkstoff wieder für die komplette Zeit t_E blockiert werden können ohne das mit unzulässigen Erwärmungen zu rechnen ist.

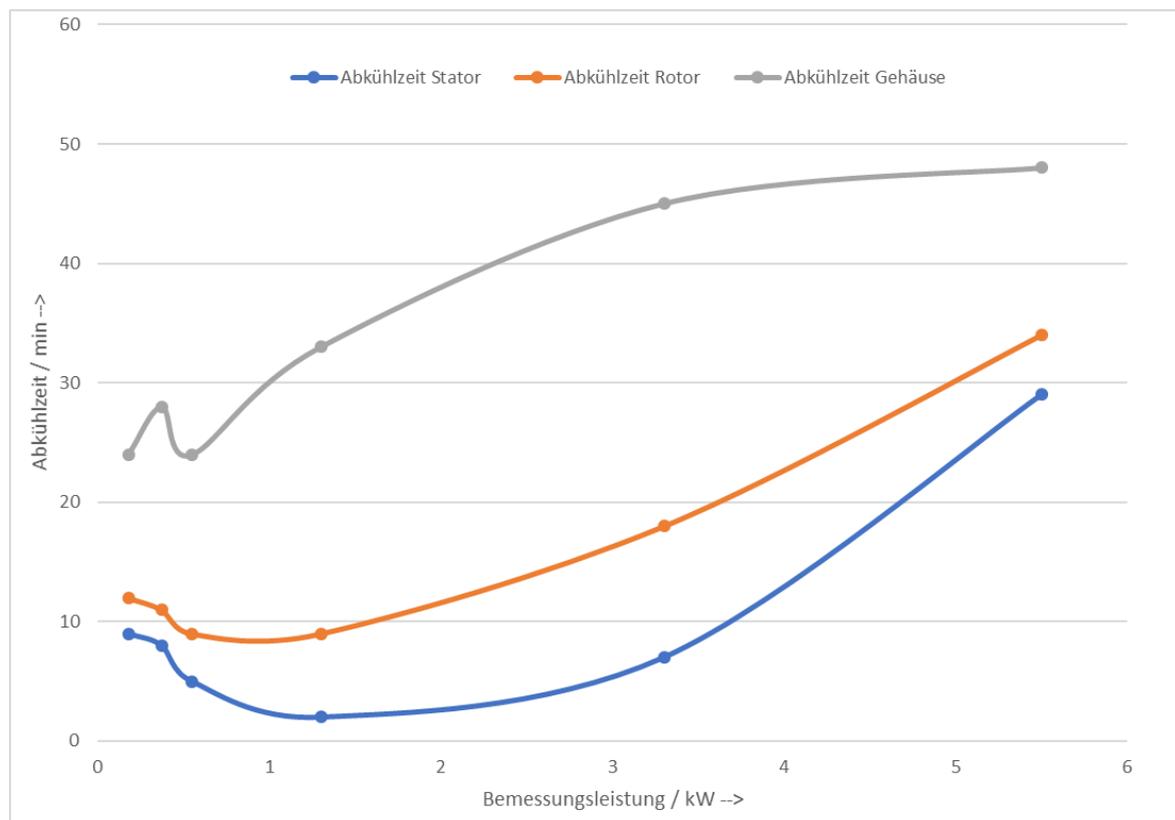


Bild 8: Übersicht über die ermittelten Abkühlzeiten nach Überlastabschaltung in Abhängigkeit der Motorbemessungsleistung bis zur Bemessungsleistung 5,5 kW

Ist z.B. durch Überwachung des Anlaufes oder über das Motorschutzgerät sichergestellt, dass die komplette Zeit t_E auch bei fehlgeschlagenem Anlauf nicht ausgeschöpft wird, kann die Abkühlzeit entsprechend verkürzt werden. Gleiches gilt möglicherweise wenn die Überlastabschaltung schon vor dem Erreichen der zwei Stunden erfolgte, nach deren Ablauf das Motorschutzgerät spätestens ansprechen muss.

Wichtige Einflussfaktoren sind hierbei vor allem die thermische Auslegung der Maschine und die nötige Zeitdauer bis zum Erreichen des thermischen Beharrungszustandes beim Betrieb mit dem 1,2-fachen Bemessungsstrom ausgehend von der Erwärmung bei Bemessungsbetrieb.

Es ist davon auszugehen, dass auch der Gehäusewerkstoff einen entsprechenden Einfluss auf das thermische Verhalten der Maschine während der Abkühlphase hat. Hierzu sind zukünftig weiterführende Betrachtungen geplant.

Im weiteren Fortgang der Untersuchungen sollen die Betrachtungen auf weitere Maschinenbaugrößen und Bemessungsleistungen erweitert werden, um hier ein möglichst detailliertes Bild zu bekommen.

Aus Sicht des Autors ist es daher auch sinnvoll, bei der Typprüfung explosionsgeschützter Maschinen zukünftig generell einen zusätzlichen Erwärmungslauf für 2 h mit dem 1,2-fachen Bemessungsstrom ausgehend von der Dauerbetriebserwärmung durchzuführen und die Zeit zu bestimmen, nach der die Maschine wieder die Bemessungstemperaturen erreicht hat. Der maximale Wert der Abkühlzeiten für das Gehäuse, den Stator und den Rotor kann dann als zusätzliche Angabe in der Motordokumentation des Herstellers oder aber auch mit dem Datenblatt zur EU-Baumusterprüfbescheinigung angegeben werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 60079-0: 2014 Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Betriebsmittel - Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2011, modifiziert + Cor.:2012 + Cor.:2013); Deutsche Fassung EN 60079-0:2012 + A11:2013
- [2] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, „Prüf- und Zertifizierungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG für explosionsgeschützte Antriebe,“ PTB, Braunschweig, 2007
- [3] DIN EN 60079-7: 2016 Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 7: Geräteschutz durch erhöhte Sicherheit "e" (IEC 60079-7:2015); Deutsche Fassung EN 60079-7:2015
- [4] B. Runge, „Einfluß der Stanztoleranz zwischen Stab und Blechpaket auf die Wärmeübergangszahl bei unverstemmten Rotorstäben,“ 29 04 1996. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF01232908>. [Zugriff am 11 082018].
- [5] Masterarbeit „Untersuchungen zum Abkühlverhalten explosionsgeschützter elektrischer Maschinen nach einer Auslösung der Motorschutzeinrichtung in Abhängigkeit der Motorbemessungsleistung“, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, vorgelegt von Benjamin Gloger am 13.11.2018
- [6] DIN EN 60947-4-1: 2014 Niederspannungsschaltgeräte Teil 4-1: Schütze und Motorstarter – Elektromechanische Schütze und Motorstarter (IEC 60947-4-1:2009 +A1:2012); Deutsche Fassung EN 60947-4-1:2010 + A1:2012
- [7] Temperaturmessung an Elektromotoren, D. Küster, Tagungsband zum CEAG Sachverständigenseminar 1989